

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.04.032

龙潭水库导流泄洪洞运行水力特性研究

刘小良¹, 张朋鹤², 王鑫²

(1. 陕西省铜川市龙潭水库建设管理处, 陕西 铜川 727031;

2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 隧洞是常见的泄水建筑物, 在水利工程中有着广泛的应用。以铜川市赵氏河龙潭水库导流泄流放空隧洞的水工模型试验为依托, 对无压泄洪洞内弯道水流特性进行了全面深入的研究, 尤其是对无压洞弯道段自由水面的高差、脉动压强的变化规律进行了研究。同时提出工程上解决无压隧洞弯道高速水流问题的方案, 可作为其他类似工程存在水力学流态问题的借鉴和参考。

关键词: 无压隧洞; 水流流态; 弯道水流; 脉动压强

中图分类号: TV651.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)04-0159-03

Hydraulic Characteristic Research of Longtan Reservoir Spillway Diversion Tunnel

LIU Xiaoliang¹, ZHANG Penghe², WANG Xin²

(1. Shaanxi Tongchuan Longtan Reservoir Administration Bureau, Tongchuan, Shaanxi 727031, China;

2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Tunnels have been widely used as common discharge structures in hydraulic engineering. According to the hydraulic model test of the diversion spillway tunnel in Tongchuan Longtan reservoir, an in-depth research on the flow characteristics at the curved section of the free flow spillway tunnel was conducted, especially on the free surface elevation and the variation of fluctuating pressure of the tunnel. The flow pattern along with the change of flow in the tunnel were the basis of designing the tunnel's size and structure. At the same time, the solutions to the high velocity flow at the curved section of the free flow spillway tunnel were proposed. This study can provide some reference for other hydraulic engineering projects with similar flow problems.

Keywords: free flow spillway tunnel; flow pattern; flow at the curved section; fluctuating pressure

水工隧洞是水利枢纽中最常用的泄水建筑物, 由于其具有断面小、洞线长、工序多、干扰大、施工条件差的特点, 故称其为水利工程中的关键性工程。对于存在弯道的隧洞而言, 其洞内水流的水力特性一直是水利工作者研究的重点。本文依托龙潭水库导流泄洪洞水工模型试验, 研究不同水头下流量的变化对隧洞流态的影响, 可作为其他类似工程存在水力学流态问题的借鉴和参考。

陕西省铜川市赵氏河龙潭水库^[1]位于铜川市耀州区西 16 km 的石川河右岸一级支流赵氏河上, 水库的主要任务是向铜川新区和耀州-黄堡工业带供

水。水库枢纽由均质土坝、右岸导流泄洪洞和库内浮船式抽水站组成。水库正常蓄水位 711.6 m, 死水位 701.24 m, 调节库容 598 万 m³。导流泄洪洞布置在大坝枢纽右侧, 属无压泄洪洞, 出口段采用扩散对称连续挑流鼻坎消能。导流洞断面为圆拱直墙型, 尺寸宽 4.5 m, 高 7.3 m, 其中直墙高度 6.0 m, 拱高 1.3 m, 半径 2.6 m, 洞身全长 492 m, 底坡 1:100, 弯道段起点桩号 0+107.1 m, 终点桩号 0+135.6 m, 转弯半径 50 m, 转角为 32°39'。2009 年 12 月 30 日导流泄洪洞开工, 2010 年 8 月贯通并完成洞内混凝土衬砌。

虽然该泄洪洞体型尺寸满足现行设计手册和规范^[2-4]中的要求,但为确保龙潭水库工程的安全稳定运行,需通过水工模型试验,系统的研究泄洪洞在不同工况下的泄流能力、水流流态及弯道水流特性,同时结合试验对存在的弯道水流问题提出合理的工程解决方案。

表 1 模型试验各物理量比尺表

物理量名称	几何比尺	流速比尺	流量比尺	压强比尺	时间比尺	糙率比尺
比尺关系	λ_L	$\lambda_V = \lambda_L^{0.5}$	$\lambda_Q = \lambda_L^{2.5}$	$\lambda_p = \lambda_L$	$\lambda_t = \lambda_L^{0.5}$	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$
比尺数值	36	6	7776	36	6	1.817121

1.2 过流能力

图 1 是龙潭水库导流泄洪洞工作闸门全开库水位与泄流量关系曲线,库水位用设在库内的旁通管量测。

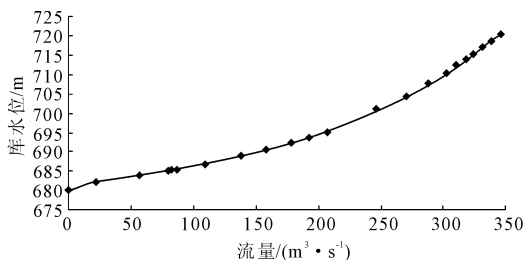


图 1 导流泄洪洞工作闸门全开库水位与泄流量关系曲线

从图 1 可看出,闸门全开时,库水位 685.15 m 以下为明流(堰流),库水位 685.15 m ~ 688.93 m 为明流到孔流的过渡段,688.93 m 以上为压力过流。表 2 是设计校核洪水位条件下设计流量与试验实测流量对比表。从表 2 可知,导流泄洪洞泄流能力基本满足要求。

表 2 设计校核洪水位条件下设计流量与试验实测流量对比表

特征洪水	设计库水位/m	设计流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	实测流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	较设计流量减小的百分数/%
设计洪水	714.76	322.00	321.55	0.14
校核洪水	719.94	346.74	343.34	0.98

1.3 流量系数

由水力学教材可知^[5],堰流综合流量系数的计算公式如下:

$$m = \frac{Q}{BH^{1.5}\sqrt{2g}} \quad (1)$$

其中: m 为堰流的流量系数,包括侧收缩、行进流速水头及其它因素影响的综合的流量系数; Q 为泄水流量, m^3/s ; B 为泄水宽度, $B = 4.5$ m; g 为重力加速

1 原设计体型模型试验测试与分析

1.1 模型设计

按佛汝德相似准则设计模型,选用 $\lambda_L = 36$,属于正态清水定床模型。模型试验各物理量比尺见表 1。

度, $g = 9.8$ m/s^2 ; H 为堰上水头,按库水位减去 680 m 计算。

孔流自由出流流量系数计算公式如下:

$$\mu_{exp} = Q/Be\sqrt{2gH} \quad (2)$$

其中: μ_{exp} 为孔流的流量系数, $\mu_{exp} = \mu\sqrt{1 - \epsilon \frac{e}{H-h}}$,它是综合反映水流能量损失和收缩程度的流量系数; Q 为泄水流量, m^3/s ; B 为泄水宽度, $B = 4.5$ m; e 为孔口高度, $e = 3.2$ m; g 为重力加速度, $g = 9.8$ m/s^2 ; H 为堰上水头,按库水位减去 680 m 计算。在开度 3.2 m,库水位低于 685.15 m 时,其流态为堰流,流量系数按堰流公式计算;库水位高于 688.93 m 时,导流泄洪洞进水口水流流态为有压流,流量系数按压力流公式进行计算;库水位在 685.15 m ~ 688.93 m 之间时,近似按压力流公式计算流量系数。计算结果如图 2 所示。设计水位 714.76 m 时,孔流的流量系数约为 0.854;校核水位 719.94 m 时,孔流的流量系数约为 0.855。

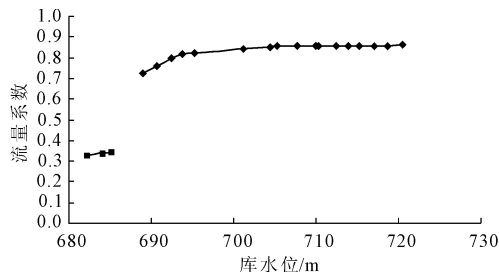


图 2 导流泄洪洞全开库水位与流量系数关系曲线

1.4 弯道水流流态分析

水流经过弯段时,由于受惯性及离心力的影响,内弯(凸岸)处水面低、外弯(凹岸)处水面高,水面产生水位差,正常蓄水位以上弯道最高水面已达到洞顶;弯道外侧最大水深与内侧最低水深差值随着库水位的升高而增加,校核水位时,最大高差值达 6.25 m。试验实测弯道外侧与内侧水深随库水位变化曲

线见图 3;弯道内外侧水深最大差值随库水位变化曲线见图 4。当库水位低于 705 m 时,弯道外侧水深低于 6 m;当库水位超过 705 m 时,弯道外侧水深将超过直墙高度,水流开始恶化,形成麻花状,并在弯道下游出现严重的高速水流折冲现象,有可能威胁导流泄洪洞正常运行。

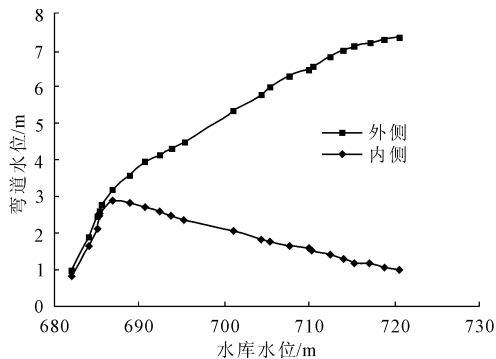


图 3 弯道外侧与内侧水深随库水位变化曲线

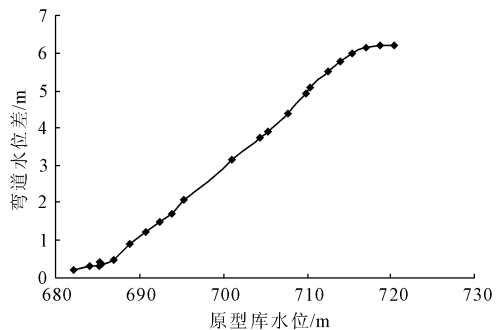


图 4 弯道内外侧水深最大差值随库水位变化曲线

1.5 导流泄洪洞弯道段壁面的脉动压强

为了研究深孔泄流隧洞弯道内上下游水位差较大时瞬时所受的脉动压强及脉动频率等参数,需要量测该弯道处的脉动压强。动水压力采用在边壁安装压力探头的方法量测,数据采集用中国水利水电科学研究院水力学所研制的 DJ800 型水工数据采集系统。

脉动压强在进行相关分析与功率谱分析时,选用波形记录时段 $T = 80 \text{ s}$,取其步长 $\Delta t = 0.016 \text{ s}$,则 $N = T/\Delta t = 5000$ 。水流脉动压力的最大可能振幅的取值,国内外研究者普遍认为,脉动压力应按式(3)选用:

$$A \frac{\min}{\max} = \pm k\sigma \quad (3)$$

式中: σ 为均方差, k 为峰值系数(表示峰值的高低和标准值的偏离程度),取 $k = 3.0$ 。本次试验脉动压强幅值按重力相似准则引伸至原型,即 $(p'/r)_r = L_r$,频率按 $f_r = 1$ 移置。

脉动压强量测结合 4 种测量方案结果如下:弯道不加斜导流坎,闸门 3.2 m 全开时,弯道的五个特征运行水位的最大脉动压强值较 2.8 m 局部开启时小

9.42 kPa;在同一开度 2.8 m 局部开启时,加斜导流坎且坎高均为 0.25 m 后,弯道的五个特征运行水位的最大脉动压强值会不同程度的增大;其中,加矩形斜导流坎时弯道的五个特征运行水位的最大脉动压强值增大 110.73 kPa;而加梯形斜导流坎时弯道的五个特征运行水位的最大脉动压强值增大 47.88 kPa。由此可知,闸门开度对弯道最大脉动压强值的影响较小;加矩形斜导流坎对脉动压强值的影响较大,加梯形斜导流坎次之,无斜导流坎时脉动压强值最小。

从量测数据中可以看到脉动压强的优势频率均较小,其值小于 1 Hz,说明水流的脉动压强属于低频范畴。

2 弯道段存在的问题及解决方案探讨

从模型试验可知,当流量较大时,水流开始恶化,形成麻花状,并在弯道下游出现严重的高速水流折冲现象,有可能威胁导流泄洪洞正常运行。为了消除已成隧洞的弯道水流问题,综合分析拟定如下 4 种方案。

2.1 方案 1:新增设左岸泄洪放水洞

根据模型试验,建议在河道左岸新增设泄洪放水压力洞,洞径为 3.5 m,与原右岸导流泄洪洞在闸门 2.8 m 局部开启限制泄洪,形成联合运行方案。在不改变原水库的特征水位和工程规模条件下,能保证泄洪要求。其优点是运用灵活,可以保证进口的“门前清”。缺点是新增设隧洞施工工期长,费用高。

2.2 方案 2:将原导流泄洪洞控制段下移至弯道下游

该方案在弯道末端后 80 m 处增设竖井,竖井前为有压洞,竖井后为无压洞。其优点是竖井前弯道段由无压流变为压力流,流态变好。缺点是新增竖井工程量大,且拆除原工作弧形闸门难度大。

2.3 方案 3:原导流泄洪洞压闸限泄运行

由模型试验可知,当校核洪水位 720.86 m 时,导流泄洪洞开度为 2.8 m,最大下泄流量为 266.7 m^3/s ,洞内外侧水深不超过直墙高度 6.0 m,但水库调蓄库容需增加。其优点是枢纽布置和运行不变。缺点是防洪库容略有增加,但可通过增设防浪墙来有效改善。

2.4 方案 4:增大弯道转弯半径

该方案将转弯半径增大至 120 m 时,洞内外侧水深就可降至直墙高度 6.0 m 以内,但需拆除已成隧洞 70 m。其优点是不新增建筑物,保持工程运行方案不变,且改造费用较低。缺点是需要拆除混凝土,拆除过程中损害大,且施工难度大。

(下转第 172 页)